

ОЦЕНКА НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ В ЗАМКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Будилов И.Н., Жернаков В.С.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Опыт производства и эксплуатации двигателей нового поколения указывает на то, что требование повышения ресурса предполагает точную оценку напряжённо-деформированного состояния (НДС) в замковых соединениях ГТД, что представляет собой сложную трёхмерную контактную задачу. Имеющиеся решения [1, 2] основаны на упрощении расчётной схемы и даны без учёта контактного взаимодействия в зоне сопряжения, что значительно снижает точность решения и существенно ограничивает область применения результатов расчёта.

Расчётные модели с равномерным или неравномерным приложением нагрузки к боковым граням замкового соединения весьма спорны и дают завышенную оценку НДС в этих соединениях. Достоверная картина НДС в замковых соединениях может быть получена только при совместном расчёте контактирующих элементов, т.е. при решении контактной объёмной задачи с учётом реальной геометрии замкового соединения.

Для поиска неизвестных зон контакта использовалась итерационная процедура на основе объединённого метода штрафных функций и метода множителей Лагранжа в виде [3]

$$f_n = \begin{cases} K_n g & \text{при } g \leq 0; \\ 0 & \text{при } g > 0 \end{cases} \quad (1)$$

и

$$f_n = \begin{cases} L_i + \alpha K_n g & \text{при } |g| \geq \varepsilon; \\ L_i & \text{при } |g| < \varepsilon, \end{cases} \quad (2)$$

где f_n - усилия в зоне контакта; K_n - матрица жёсткости контактного элемента; g - зазор между точками контактирующих тел.

Контактные усилия в зоне сопряжения определяли из соотношения

$$\{F_e^{nr}\} = f_n \{N_n\} + f_x \{N_x\} + f_y \{N_y\}, \quad (3)$$

где f_n, f_x, f_y - единичные усилия; N_n, N_x, N_y - опорная площадь контакта.

Отсутствие проскальзывания в контакте деталей реализуется в виде

$$\mu|F_n| > F_s, \quad (4)$$

где μ - коэффициент трения; F_n - нормальная составляющая вектора силы;
 F_s - тангенциальная составляющая вектора силы;
а условие скольжения -

$$\mu|F_n| = |F_s| \quad (5)$$

Основное разрешающее уравнение с учетом зазора будет иметь вид [4]

$$\{F_e^{nr}\} = [K_e]\{u_{s,J} - u_{s,I} - u_0\} \quad (6)$$

или в матричном виде

$$\begin{Bmatrix} F_s \\ F_n \\ -F_s \\ -F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s & 0 & -K_s & 0 \\ 0 & K_n & 0 & -K_n \\ -K_s & 0 & K_s & 0 \\ 0 & -K_n & 0 & K_n \end{bmatrix} \{u_{s,J} - u_{s,I} - u_0\}, \quad (7)$$

где K_s , K_n - нормальная и тангенциальная матрицы жёсткости; u - перемещение в зоне контакта.

Алгоритм решения контактной задачи позволяет учесть объёмные нагрузки и произвольно смешанные граничные условия.

Оценка НДС замкового соединения в условиях контактного взаимодействия выполнялась с помощью вычислительного комплекса ANSYS 5.5.

Геометрия модели замкового соединения описывалась с помощью смешанного граничного представления и параметрических кубических уравнений и В-сплайнов.

Кроме того, были использованы:

- автоматическое построение сетки КЭ;
- адаптивное построение сетки КЭ;
- параметризация модели.

Контактные элементы "точка-плоскость", показанные на рис.1, позволили определить наиболее реальную картину напряжений в зоне контакта замкового соединения. При этом на каждом шаге итерационного

процесса вычислялось местоположение узла при его движении по поверхности согласно соотношению:

$$S^* = -1 + 2[(\{x_k\} - \{x_1\})^T \{S\}] / L. \quad (8)$$

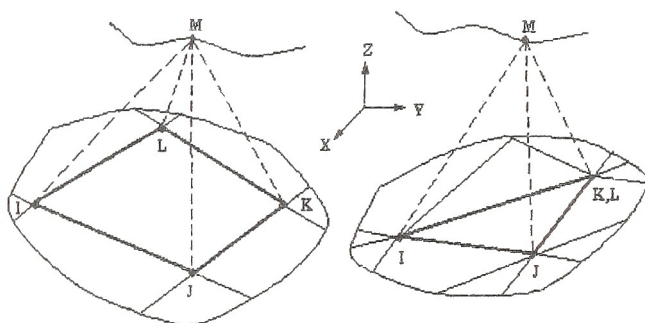


Рисунок 1 - Контактные элементы “точка-плоскость”

Фактические реакции в зоне контакта определялись по уравнению (3). Итерационное решение осуществлялось с помощью известного метода Ньютона – Рафсона [4].

С использованием при моделировании замковых соединений объёмных контактных элементов удалось в наиболее полной мере учесть особенности граничных условий и получить оценки НДС, в том числе с учётом трения по боковым граням.

Расчётная схема фрагмента КЭМ замкового соединения ГТД (рис.2) содержала: 585 элементов; 674 узла; 269 – оптимизированная ширина матрицы жёсткости.

По результатам расчётов строились изолинии компонент НДС ($\sigma_1, \sigma_y, \sigma_{eq}, \tau_{xy}, \tau_{xz} \dots$), а также определялись значения компонент НДС по линии контакта замкового соединения.

На рис.3 показано распределение σ_r в форме изолиний, когда в соединении действует весь комплекс реальных нагрузок ($\sigma_{раст}, M_{изг}, M_{кр}$). Установлено, что с изменением коэффициента трения от 0,3 до 0 происходит рост напряжений в зоне радиусного сопряжения доньшка паза с контактной гранью.

Установлено, что учёт действия моментов M_{rx} и M_{ry} от газодинамических сил, действующих на перо лопатки, приводит к увеличению значений отдельных компонент напряжений, например σ_1, σ_y в зоне контактного взаимодействия и в зоне радиусного сопряжения замкового соединения, а также к изменению характера изолиний по толщине детали.

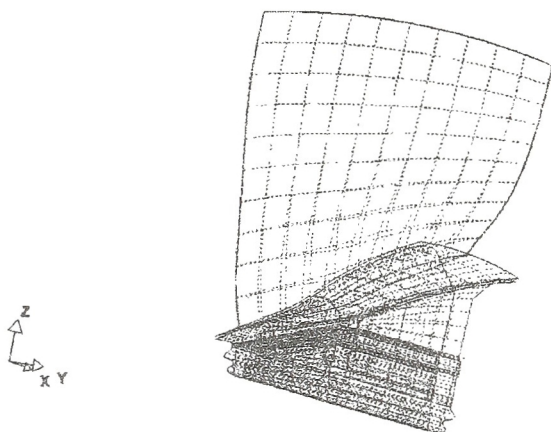


Рисунок 2 - Конечно-элементная модель лопатки I ступени КНД

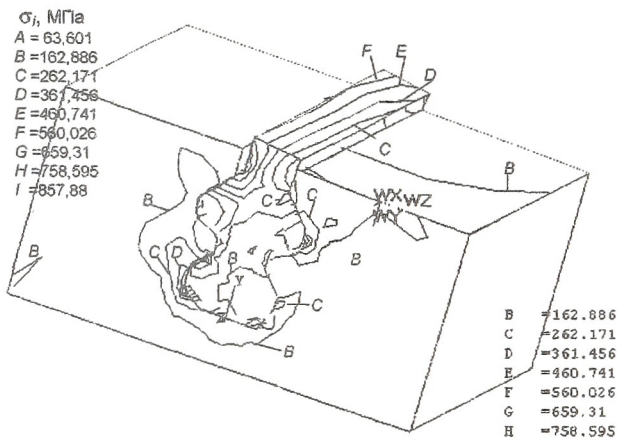


Рисунок 3 - Распределение интенсивности упругих напряжений

При совместном действии растягивающих, изгибающих и крутящих нагрузок неравномерность распределения напряжений на площадке контакта замкового соединения ГТД увеличивается до двух раз, в то время как коэффициент концентрации напряжений в галтели паза возрастает лишь на 20 %. Показано, что изгибающие и крутящие моменты воспринимаются по всей рабочей поверхности хвостовика. В общем случае зона σ_i^{max} смещена на 0,15 высоты грани замка внутрь площадки контакта и является наиболее вероятным местом появления очага зарождения трещины. При продвижении сечения по толщине замкового соединения наблюдается заметное перераспределение упругих напряжений σ_i с уменьшением

площади контура максимальных напряжений, что, по-видимому, связано с ростом стеснённости напряжённого состояния и переходу от ПНС к ПДС. Графики рис.4 характеризуют распределение компонент напряжений по линии контактной грани замкового соединения.

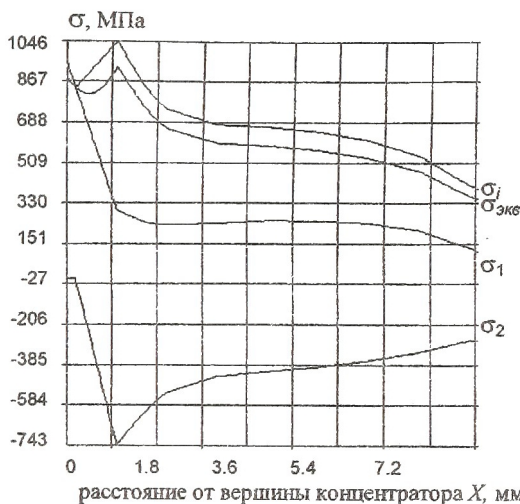


Рисунок 4 - Распределение компонент напряжений в области концентратора в замковом соединении

Таким образом, расчёты на объёмных КЭМ с учётом контактного взаимодействия в зоне сопряжения деталей позволяют в наиболее полной мере учесть особенности граничных условий и получить реальные оценки НДС. Полученные численные результаты позволили уточнить имеющиеся решения и тем самым существенно повысить достоверность исследования напряжённо-деформированного состояния в замковых соединениях ГТД.

Список литературы

1. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчёт на прочность деталей машин.-М.: Машиностроение, 1979.-702 с.
2. Расчёт на прочность авиационных газотурбинных двигателей /И.А.Биргер, В.М.Даревский, И.В.Демьянушко и др.-М.: Машиностроение, 1984.-208 с.
3. Мавлютов Р.Р. Концентрация напряжений в элементах авиационных конструкций.-М.:Наука, 1996.-240 с.
4. Ansys. Structural Nonlinearities. User's Guide for Revision 5.0.-V.1.-SASI, Houston.-1994.-DN0S201:-1.